

MODELISATION DE L'IMPACT VIBRATOIRE DU CREUSEMENT AU TUNNELIER SUR ELEMENTS DE FONDATIONS PROFONDES

Marianna Feuillas¹, Theodora Makrypidi¹, Charisis Chatzigogos¹

¹Géodynamique & Structure

Email : marianna.feuillas@geodynamique.com

1. INTRODUCTION

L'expansion des infrastructures souterraines en zones urbaines denses soulève des défis liés à la propagation des vibrations et à leur impact sur les structures environnantes. Cette étude, réalisée dans le cadre du projet ANR E-PILOT (2022-2026), vise à développer des modèles numériques avancés pour caractériser ces impacts. En combinant les méthodes des éléments finis (FEM) et des éléments de frontière (BEM), elle analyse l'influence des fondations profondes sur la propagation des vibrations générées par le creusement mécanisé. L'objectif est de quantifier l'influence des fondations profondes sur la propagation des vibrations et de déboucher sur le développement d'outils simplifiés (abaques) utilisables en ingénierie en phase de conception des ouvrages souterrains.

2. METHODOLOGIE ET MODELISATION

Selon les principes établis dans la norme ISO14837-1 (ISO 14837-1:2005), le mécanisme de génération de vibrations transmises par le sol se décompose en trois phases : l'émission, la transmission et l'immission comme illustré sur la Figure 1.

Dans cette étude nous nous concentrons uniquement sur les vibrations transmises par le sol et donc l'équation générale que nous utilisons pour calculer les niveaux vibratoires L_V , au niveau de la structure, pendant le creusement au tunnelier est la suivante :

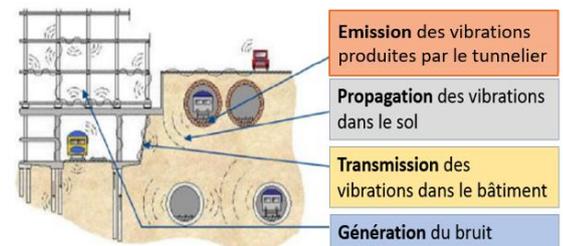


Figure 1 : Méthode générale d'évaluation des vibrations transmises par le sol (ISO 14837-1:2005)

$$L_V = LF + TM + C_{ISS} + C_{str} \quad (1)$$

avec la phase d'émission décrite par le spectre de force représentant les efforts exercés par le tunnelier sur le front de taille (LF) ; la phase de propagation/transmission décrite par la mobilité de transfert entre le front du tunnel (source vibratoire émise par le tunnelier) et un point du sol près des fondations du bâtiment (TM) ; et enfin, la phase d'immission décrite par les facteurs exprimant l'interaction sol-structure dans la transmission des vibrations au sein de la structure (C_{ISS}) et l'amplification des vibrations en raison de la réponse dynamique des éléments structurels impactés (C_{str}) (Makrypidi et al., 2023).

Concernant la modélisation on a utilisé les méthodes de couplage FEM-BEM implémentées dans le logiciel SASSI (Ostadam et al., 2012). Nous utilisons la méthode FEM pour modéliser le tunnel, les fondations et structures voisines et les hétérogénéités du sol, et la méthode TLM (thin layer method) qui est une variante de la méthode BEM, pour simuler la propagation des ondes dans un sol stratifié. Les modélisations, réalisées par étapes, intègrent progressivement différents types de structures : pieu unique, groupe de pieux, bâtiment sur fondations profondes. Les efforts exercés par le tunnelier sur le front de taille sont représentés par leurs composantes normale (action de soutènement) et tangentielle (action de découpe du terrain).

3. PROFIL DE SOL - MODELES D'ETUDE

Le profil de sol retenu pour les calculs présente une caractéristique importante pour la propagation des vibrations : la partie haute du tunnel est située dans une couche molle (GV : green clays) avec une vitesse de cisaillement (V_S) de 230m/s, tandis que les couches supérieures (MSG : marno-calcaires) sont plus rigides : ainsi, les ondes générées par le tunnelier sont partiellement reflétées sur l'interface GV-MSG. Ce profil de sol est dit "atténuant" car l'énergie vibratoire est « piégée » dans la couche molle ce qui conduit à une réduction de l'amplitude des vibrations dans les couches supérieures. Les données du profil géologique étudié (cf. Figure 2) sont obtenues par des mesures réalisées pendant l'excavation de la ligne 18 du métro de Paris dans le cadre du projet E-PILOT (Aslan et al., 2024).

Au total on a créé 4 modèles tridimensionnels allant du plus simple au plus complexe (Champ libre / Pieu unique / Groupe de pieux / Système structurel) et on a représenté le régime de force exercée par le tunnelier via une contrainte harmonique selon l'axe Y (pression frontale) et l'axe Z (contrainte de cisaillement). Chaque modèle a été conçu pour observer comment les vibrations, exprimées en termes de déplacements et de vitesses, se propagent dans différentes couches de sol en interaction avec des structures de complexité croissante. Les calculs portent sur la détermination des mobilités de transfert (TM), permettant d'observer la propagation des vibrations, et sur le terme C_{ISS} qui exprime la différence de la TM calculée en champ libre et la réponse avec la présence d'une fondation / structure. Le terme C_{ISS} est aussi appelée « facteur de gains d'insertion » (IG).

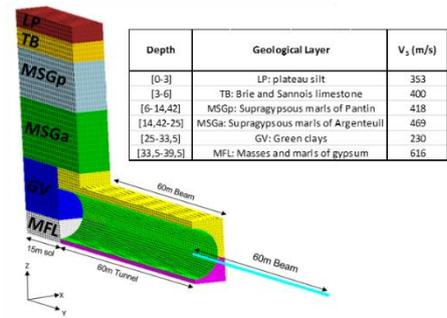


Figure 2 : Modélisation FEM-BEM et profil géologique de l'étude

4. RESULTATS

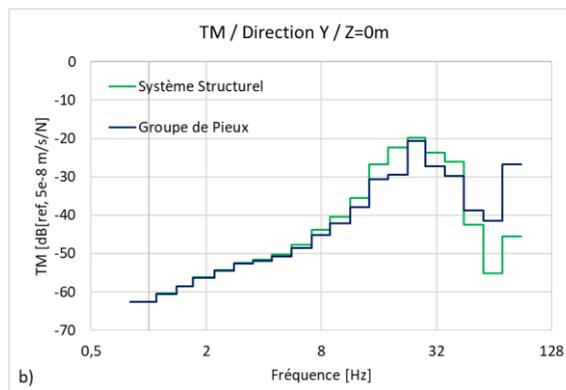
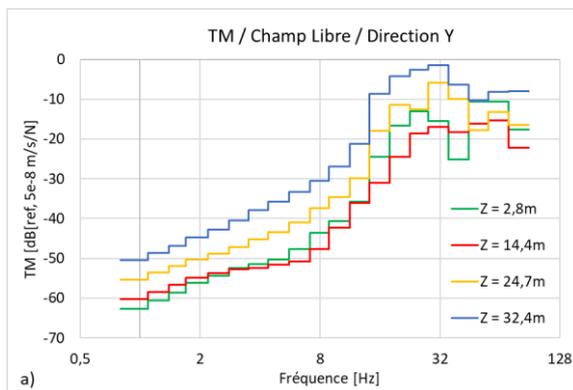


Figure 3 : a) Mobilité de transfert pour le modèle « Champ Libre » à différentes profondeurs, b) Mobilité de transfert calculée à la surface pour les modèles « Groupe de Pieux » et « Système Structurel »

Les résultats montrent l'impact des fondations profondes sur la propagation des vibrations. Après avoir appliqué une force harmonique unitaire selon l'axe Y au front du tunnel, nous avons analysé la propagation des

ondes en fonction de la profondeur Z, en gardant constantes les coordonnées X et Y (X, Y sur le front de tunnel).

Dans le modèle en *Champ Libre*, la TM augmente avec la fréquence (cf. Figure 3a), avec une transition autour de 16Hz, et une croissance jusqu'à 64Hz. À basses fréquences (<10Hz), la TM reste faible, mais au-delà, des variations apparaissent, notamment entre la couche molle proche de la source et la couche plus rigide à une profondeur de $Z = 14.4m$. Concernant les directions de propagation, les vitesses sont plus marquées en direction Y, ce qui est cohérent avec la direction du chargement, tandis que celles en direction Z sont plus faibles.

Pour le *Pieu Unique*, la TM est affectée mais pas de manière significative. Elle augmente jusqu'à 32Hz, où elle se stabilise ; sa valeur maximale est atteinte à la profondeur $Z = 32.4m$ (profondeur du tunnel) et diminue en remontant vers la surface.

Pour le *Groupe de Pieux*, les pieux se comportent comme un ensemble rigide, mais à mesure que la profondeur augmente, leurs TM divergent. L'analyse se concentre sur le pieu central, représentatif du groupe. La mobilité de transfert en direction Y augmente jusqu'à une fréquence de 30Hz environ et ensuite elle diminue (cf. Figure 3b).

Le modèle *Système Structurel* (SS), introduisant une masse représentant un bâtiment à la tête du pieu central, amplifie la TM entre 8Hz et 35Hz, en particulier dans la direction Y (cf. Figure 3b). Cette amplification est liée aux résonances du système, notamment au mode de pompage du bâtiment à 35Hz. Au-delà de 35Hz, la TM du SS diminue par rapport au groupe de pieux, indiquant une atténuation des vibrations à haute fréquence.

Concernant le gain d'insertion (IG), les résultats montrent que l'impact d'un pieu unique reste limité, notamment dans la direction Y où son effet de rigidification est faible. Lorsqu'un groupe de pieux est introduit, l' IG devient plus significatif, bien que l'effet reste modéré à basses fréquences (<8Hz). L'ajout d'une masse, représentant une

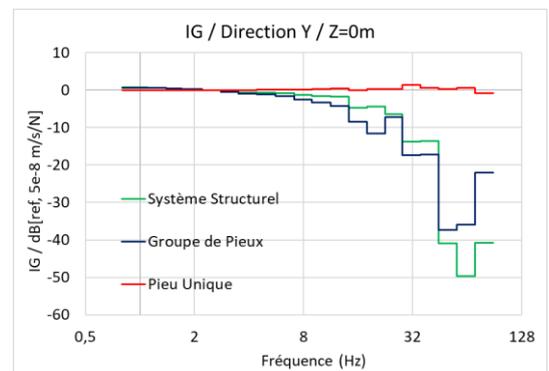


Figure 4 : Gain d'insertion selon la direction Y pour les 3 modèles

superstructure, amplifie les vibrations autour de la fréquence propre du bâtiment (environ 35Hz), avant d'entraîner une atténuation des vibrations au-delà de 35Hz.

La dernière étape consiste à appliquer une force harmonique unitaire selon l'axe Z au front du tunnel (chargement tangentiel) pour analyser la propagation des ondes en fonction de la profondeur Z, en maintenant fixes les coordonnées X et Y (sur le front du tunnel). La Figure 3 illustre l'effet du chargement tangentiel sur le gain d'insertion (IG) par rapport au chargement normal du modèle SS, montrant que le comportement du système est principalement gouverné par la direction du chargement appliqué, avec un IG plus élevé dans cette direction. Jusqu'à 8Hz, on observe une faible amplification des vibrations sous chargement tangentiel (Z) et une faible atténuation sous chargement normal (Y). En général, le chargement normal entraîne une plus grande atténuation des vibrations sur toute la plage de fréquences (0.8 à 89Hz), et à la fréquence propre du système (35Hz), une diminution marquée du IG est observée dans les deux cas de chargement.

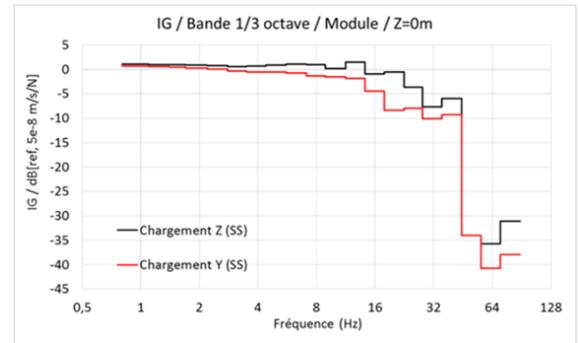


Figure 5 : Gain d'insertion pour un chargement normal et tangentiel selon le « Système Structurel »

CONCLUSIONS

Cette recherche porte sur l'étude d'impact des vibrations générées par le creusement en milieu urbain sur les éléments de fondations profondes. L'intégration des fondations profondes et des structures de surface dans les modèles de propagation d'ondes montre que ces éléments modifient significativement la mobilité de transfert et les niveaux vibratoires, en particulier aux fréquences critiques de ces structures. Plus précisément, on observe une amplification des vibrations à la fréquence propre du système et une atténuation pour les fréquences supérieures à cette dernière.

Les perspectives de cette étude visent à créer des abaques permettant de déterminer rapidement les gains d'insertion (IG) pour diverses configurations de bâtiments, groupes de pieux et types de sol. Cet outil facilitera l'évaluation rapide des niveaux vibratoires sur les structures et les fondations en fonction de différents scénarios. L'exploration de différents types de fondations et de structures vont enrichir les résultats du projet. Une thèse sur cette thématique est actuellement en préparation et approfondira ces recherches.

5. REFERENCES

Aslan Y, Rallu A, Branque D, Berthoz N, Chatzigogos CT, Makrypidi T (2024). *Monitoring and analyzing vibrations from tunnel boring machines in urban areas*. In *ECSMGE 2024: 18th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

E-PILOT, "Le projet E-PILOT", e-pilot.univ-gustave-eiffel.fr, <https://e-pilot.univ-gustave-eiffel.fr/projet/le-projet-e-pilot>, Consulté le 12 août 2024.

ISO 14837-1:2005, Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: General guidance.

Makrypidi T, Chatzigogos CT, Gobbi S, Nazé PA (2023). *Effect of deep foundation elements on transfer mobilities for ground-borne vibrations in urban railway tunnels*. In *COMPDYN 2023, 9th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. pp. 5003–16. Athens, Greece. doi:10.7712/120123.10778.20798.

Ostadam, Farhang, Deng, Nan. 2012. SASSI 2010, A System For Analysis Of Soil-Structure Interaction, Version 1.0, User's Manual